

# Lentes metálicas basadas en el fenómeno de transmisión extraordinaria para conseguir índices de refracción negativos

M. Navarro-Cía<sup>(1)</sup>, M. Beruete<sup>(1)</sup>, M. Sorolla<sup>(1)</sup>, and I. Campillo<sup>(2)</sup>

miguel.navarro@unavarra.es, miguel.beruete@unavarra.es, mario@unavarra.es, i.campillo@nanogune.eu

<sup>(1)</sup>Millimeter and Terahertz Waves Laboratory, Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía, 31006 Pamplona, España

<sup>(2)</sup>CIC nanoGUNE Consolider, Tolosa Hiribidea 76, 20018 Donostia, España

**Abstract**—In this communication we report plano-concave and bi-concave metamaterial lenses based on the close stack of subwavelength hole arrays. Contrary to what is expected from cut-off holes, an engineered array of holes supports Extraordinary Transmission. Moreover, the medium formed when those structures are subwavelength stacked (thus, under metamaterial condition) behaves as a medium with effective negative index of refraction, which allows designing new lenses with properties that were only guessed at not long ago such as perfect imaging, subdiffraction and free-space matching to name a few.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la actividad investigadora sobre el control de la propagación electromagnética se ha visto fuertemente incrementada a raíz del nacimiento de los metamateriales [1], [2]. Estas estructuras artificiales han permitido la creación de medios que por ejemplo presentan una respuesta efectiva macroscópica de índice de refracción negativo como resultado habitualmente de la combinación de dos resonancias, una en la permitividad eléctrica,  $\epsilon$ , y la otra en la permeabilidad magnética,  $\mu$  (medios zurdos).

Animados por el buen comportamiento de los metamateriales en microondas, las actuales líneas de investigación han puesto su atención en la obtención de metamateriales con índice de refracción negativo a frecuencias más altas [3]. El principal problema con el que se han encontrado entonces ha sido el gran aumento de las pérdidas para las estructuras metamateriales habituales. Una solución propuesta por el Laboratorio de Ondas Milimétricas y Terahercio, ha sido la reducción de dichas pérdidas mediante el fenómeno de Transmisión Extraordinaria [4], [5]. Combinando ambos fenómenos, se ha conseguido confirmar el comportamiento de índice de refracción efectivo negativo con muy bajas pérdidas en el rango de las ondas milimétricas mediante técnicas interferométricas [6] y experimentos de ley de Snell basados en prismas [7]. A dicho medio se le ha denominado *Extraordinary Transmission Metamaterial*, ETM.

En el campo de las lentes y conformado de haces, el ETM puede aportar grandes ventajas por dos motivos principalmente:

1) Potencialmente y como consecuencia de la habilidad

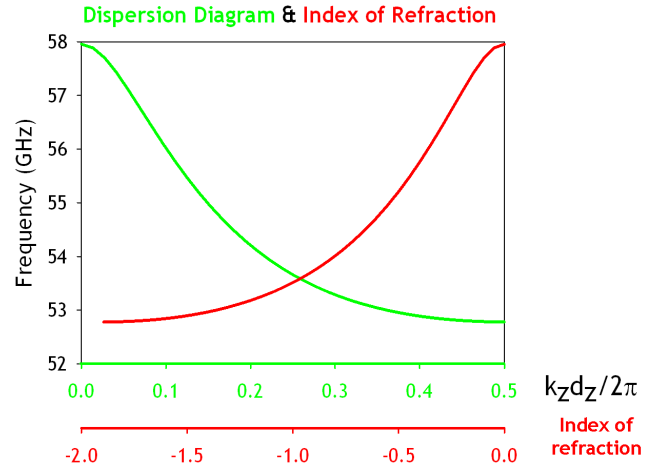


Fig. 1. Diagrama de dispersión (curva verde) e índice de refracción efectivo asociado a dicho modo (curva roja).

para predeterminar el valor de  $\epsilon$  y  $\mu$ , se puede conseguir adaptación total de la lente a su entorno ya que  $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ .

2) Debido al índice negativo, para una distancia focal determinada, una lente basada en ETM permite un radio de curvatura mayor que las lentes con índices de refracción positivos y por tanto las aberraciones se minimizan.

Además, hay que destacar que los perfiles cóncavo y convexo cambian su papel en las lentes zurdas, siendo los primeros los cuales hacen converger a las ondas electromagnéticas, mientras los segundos las hacen diverger [1]. Por tanto, para lentes convergentes, el volumen ocupado por la lente es menor en el caso de lentes zurdas.

En esta comunicación presentamos la aplicación del ETM para el diseño de lentes. Se demuestra experimentalmente la viabilidad de fabricar lentes bajo esta tecnología con perfiles plano-cóncavos [8] y bi-cóncavos [9] en el rango de las ondas milimétricas. Las primeras muestran la capacidad para concentrar la radiación de un frente de ondas plano en un foco, mientras que las segundas permiten trasladar el foco.

## II. DISEÑO DE LENTES CON ÍNDICE DE REFRACCIÓN EFECTIVO $n = -1$

La forma de un espejo parabólico tiene la propiedad de concentrar los rayos paralelos que inciden sobre su superficie en un punto llamado foco de la parábola. Recíprocamente, los rayos emitidos por una fuente puntual situada en dicho foco se reflejan en el espejo parabólico dando lugar a un frente de ondas plano (rayos paralelos).

En el ámbito de la óptica geométrica, la reflexión suele describirse en términos de índice de refracción  $n = -1$  como una mera herramienta matemática [10] (si se sustituye en la ley de Snell uno de los índices por  $n = -1$ , esta da lugar a la ley de la reflexión especular). Sin embargo, con la llegada de los metamateriales este formalismo es un hecho. Es decir, el habitual reflector parabólico, se puede sustituir por una lente parabólica con índice de refracción  $n = -1$  trabajando en transmisión, en lugar de en reflexión [11].

Para hacer realidad esta idea, el primer paso que hay que hacer es caracterizar la frecuencia a la cual nuestra estructura se comporta como un medio con índice de refracción efectivo  $n = -1$ . Para ello hacemos uso del software CST Microwave Studio<sup>TM</sup> para calcular el diagrama de dispersión del apilamiento infinito. De la estructura de bandas posteriormente, se deriva el índice de refracción a través de la relación  $n = ck/\omega$ . Para los siguientes parámetros de la matriz de agujeros: diámetro de agujero  $a = 2.5mm$ , dimensiones transversales de la celda unidad  $d_x = 3mm$ ,  $d_y = 5mm$ , espesor de metal  $w = 0.5mm$ , y periodicidad del apilamiento  $d_z = 1.5mm \sim 0.27\lambda$ ; el diagrama de dispersión y su correspondiente índice de refracción son los presentados en la Fig. 1. Como se puede observar, dentro de la zona de corte de los agujeros (frecuencia de corte de un agujero individual  $f_c = 70GHz$ ) existe una banda de paso con pendiente negativa, es decir, con velocidad de fase y grupo antiparalelas. Esto da lugar a la llamada propagación zurda con un índice de refracción efectivo dependiente de la frecuencia que alcanza un valor de  $n = -1$  a 53.5 GHz. Hay que destacar que debido a la variación del índice con respecto a la frecuencia el diseño propuesto es de banda estrecha y sufre aberración cromática.

Bajo esas condiciones, se puede diseñar una parábola formada por el apilamiento de matrices de agujeros al corte. Se aproxima la curva de la parábola escalonadamente, con un paso determinado por las dimensiones de la celda unidad. Toda la estructura, incluyendo el marco de la asamblea, tiene como dimensiones máximas 125 mm x 115 mm, ver Fig. 2. Teniendo en cuenta estas dimensiones y el hecho de que la distancia focal se ha diseñado para que sea 50 mm, las medidas que se van a realizar son en campo cercano ya que  $2D^2/\lambda \sim 6250mm$ .

Previo al experimento, y con ayuda de CST Microwave Studio<sup>TM</sup>, se calcula la distribución de potencia en la región imagen de las lentes plano- y bi-cóncava para los casos ideales en los que la iluminación se realiza con una onda plana (en el caso de la lente plano-cóncava) o con un dipolo (en el caso de la lente bi-cóncava). De esta manera se puede comprobar si

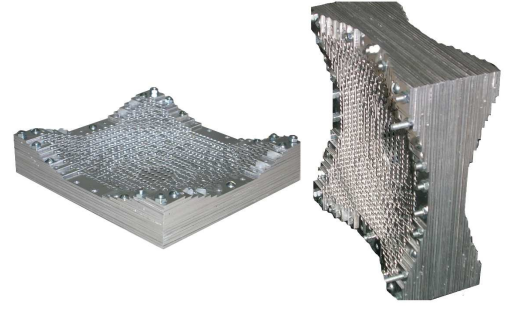


Fig. 2. Fotos del prototipo de lente ETM plano-cóncava (izquierda) y bi-cóncava (derecha).

nuestro diseño basado en el diagrama de dispersión y teoría de rayos es consistente. La distribución de potencia para ambas lentes y ambos planos de corte a la frecuencia de diseño se presentan en la Fig. 3 y muestran concentración de potencia a la distancia a la cual se ha diseñado la distancia focal de las lentes.

## III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la comprobación del funcionamiento de las lentes, se llevaron a cabo dos configuraciones experimentales. En la primera, la cara plana de la lente plano-cóncava es iluminada con un frente de ondas Gaussiano (como aproximación a un frente de onda plano) que ha sido generado por una antena de bocina corrugada colocada a 900 mm de la lente ETM, y en el plano imagen, la potencia radiada transmitida es recogida con otra antena de bocina idéntica a la fuente tanto en el plano  $xz$  (plano del campo magnético) como el  $yz$  (plano de campo eléctrico), para cuatro diferentes distancias  $z = 35, 45, 50, 75$  mm. En cambio, para el segundo experimento, la lente bi-cóncava es iluminada mediante una guíaonda rectangular (como aproximación a una fuente puntual) colocada en el foco (calculado experimentalmente mediante el anterior experimento) y el campo transmitido es escaneado tanto a lo largo del eje óptico como en ambos planos (a la distancia del foco) con una guíaonda idéntica a la fuente. En ambos casos, ambas antenas están conectadas al analizador vectorial de redes cuasióptico AB-mm<sup>TM</sup> para la caracterización de la medida y la calibración se realiza simplemente haciendo una medida de cada configuración sin la introducción de la lente ETM.

### A. Lente plano-cóncava

Los resultados correspondientes a la lente plano-cóncava se muestran en la Fig. 4. Claramente de esa figura se desprende que se obtiene un foco a la distancia de 45 mm (ligeramente desplazado del diseño. El hecho de estar en la región de Fresnel y con una iluminación aproximada de una onda plana, puede ser el motivo del ligero desplazamiento observado), ya que para ambos planos, la anchura de haz a -3 dB alcanza su valor mínimo. Además, el otro rasgo característico de esa figura es que el foco es asimétrico, con un mayor confinamiento en el plano  $xz$ .

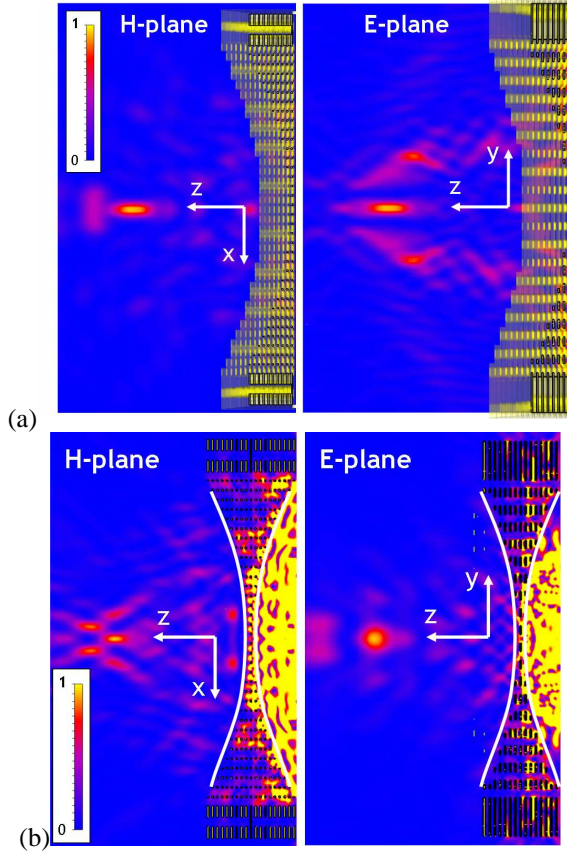


Fig. 3. (a) Distribución de potencia en el plano H (izquierda) y en el plano E (derecha) para una lente ETM plano-cóncava iluminada por su cara plana mediante un frente de ondas plano. (b) Distribución de potencia en el plano H (izquierda) y en el plano E (derecha) para una lente ETM bi-cóncava iluminada con un dipolo colocado en el foco de una de las caras.

### B. Lente bi-cóncava

Por otro lado, la Fig. 5 presenta los resultados obtenidos en el experimento de la lente bi-cóncava. En este caso, la concentración de potencia aparece justo en el foco imagen, es decir, a 45 mm de la lente (ver detalle superior). Es destacable en esta figura que los lóbulos laterales tienen mayor nivel en el plano  $xz$ .

## IV. CONCLUSIONES

En resumen, en esta comunicación introducimos nuevas ideas en el campo de las lentes metálicas iniciado por Kock allá por los años 40 con ayuda de los Metamateriales zurdos y la Transmisión Extraordinaria. Resultados prometedores se obtienen tanto con lentes plano-cóncavas como con lentes bi-cóncavas para el conformado de haces. Es esperable que esta nueva tecnología que combina los Metamateriales con el fenómeno de Transmisión Extraordinaria y que promete ser una herramienta muy potente de diseño pueda ser aplicada en cualquier rango del espectro ya que estructuras con Transmisión Extraordinaria (el fenómeno fundamental para la obtención de una banda con índice de refracción efectivo negativo con pocas pérdidas) han sido demostradas en todos los rangos de frecuencia.

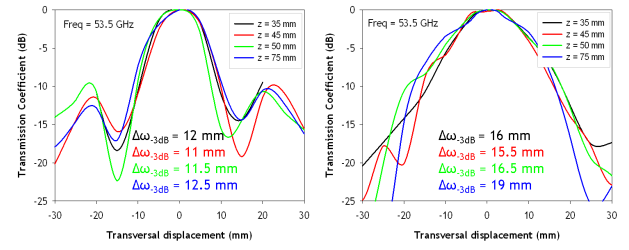


Fig. 4. Coeficiente de transmisión en escala logarítmica normalizado al máximo de cada distancia para el plano  $xz$  (figura izquierda) y el plano  $yz$  (figura derecha).

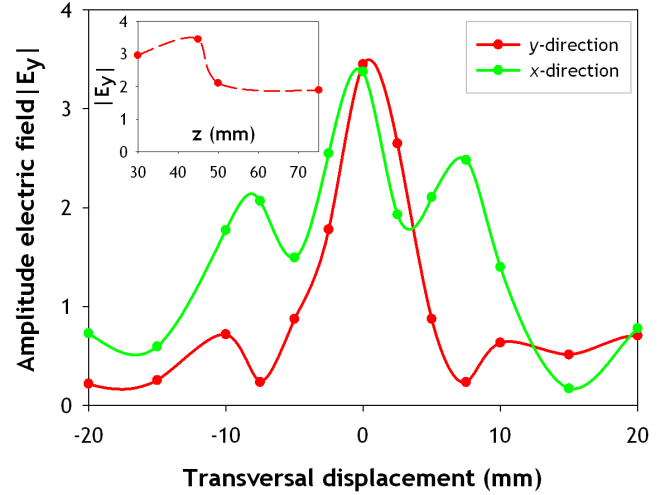


Fig. 5. Magnitud del campo eléctrico en dirección  $y$  - plano E - (curva roja) y dirección  $x$  - plano H - (curva verde). Detalle superior izquierda: magnitud del campo eléctrico a lo largo del eje óptico de la lente.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia mediante Plan Nacional de I+D+I (2008-2011) TEC2008-06871-C02-01.

## REFERENCES

- [1] V.G Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ " Soviet Phys. Ups., vol. 10, pp. 509-514, 1968.
- [2] J.B Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens" Phys. Rev. Lett., vol. 85, pp. 3966-3969, 2000.
- [3] C.M. Soukoulis, S. Linden, and M. Wegener, "Negative Refractive Index at Optical Wavelengths" Science, vol. 315, pp. 47-49, 2007.
- [4] Ebbesen TW, Lezec HJ, Ghaemi H, Thio T, and Wolf PA, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays" Nature, vol. 391, pp. 667-669, Dec. 1998.
- [5] M. Beruete, M. Sorolla, I. Campillo, J. S. Dolado, L. Martín-Moreno, J. Bravo-Abad, and F. J. García-Vidal, "Enhanced millimetre wave transmission through subwavelength hole arrays" Opt. Lett., vol. 29, pp. 2500-2502, 2004.
- [6] M. Beruete, M. Sorolla, and I. Campillo, "Left-Handed Extraordinary Optical Transmission through a Photonic Crystal of Subwavelength Hole Arrays" Opt. Express, vol. 14, pp. 5445-5455, 2006.
- [7] M. Navarro-Cía, M. Beruete, M. Sorolla, and I. Campillo, "Negative Refraction in a Prism Made Of Stacked Subwavelength Hole Arrays" Opt. Express, vol. 16, pp. 560-566, 2008.

- [8] M. Beruete, M. Navarro-Cía, M. Sorolla, and I. Campillo, "Planoconcave lens by negative refraction of stacked subwavelength hole arrays" *Opt. Express*, vol. 16, pp. 9677-9683, 2008.
- [9] M. Navarro-Cía, M. Beruete, M. Sorolla, and I. Campillo, "Converging beconcave metallic lens by double-negative extraordinary transmission metamaterial" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, pp. 144107-1-3, 2009.
- [10] S. Cornbleet, *Microwave Optics-The Optics of Microwave Antenna Design*, 1st ed., Academic press, 1976.
- [11] N. Engheta, and R.W. Ziolkowski, "A Positive Future for Double-Negative Metamaterials" *IEEE Trans. on Microw. Theory Tech.*, vol. 53, pp. 1535-1556, 2005.